原子物理期末复习讲义

南窗鹧鸪

2026 年 06 月 20 日

目录

1 原子模型 **2**

2 量子力学基础 **3**

3 精细结构 **3**

4 多电子原子 **5**

5 X 射线 **7**

1 原子模型

题目 1.1. 动能为 E、质量为 m 的 α 粒子，以瞄准距离 b 射向核电荷数为 Z 的静止的重核。试求：

（1）被散射的 α 粒子的动量增量的绝对值；

（2）对于给定的瞄准距离 b，E 为何值时，动量增量绝对值最大？此时的散射角 θ 为多大？

【知识点】卢瑟福公式 【来源】物理学大题典 *1.5*

题目 1.2. 一个加速器提供动量为 $200\,\mathrm{MeV}/c$ 和 $10^{12}/\mathrm{s}$ 个粒子的质子束，这束粒子穿过 $0.01\,\mathrm{cm}$ 厚的铝片（铝的密度 $\rho = 2.7\,\mathrm{g/cm^3}$，$Z = 13$，$A = 27$）。

(1) 如果你记得，请写下以 $\mathrm{cm^2/sr}$ 为单位的卢瑟福散射的微分散射截面公式。如果记不得，请写出最好的猜测，确定对 Z 的依赖关系及对能量、角度的依赖关系，并要有合理的量纲。利用你给出的表达式，不论是准确的还是最好的估计，计算下面 (2) ∼ (5) 中的问题。

(2) 对于上述粒子束，已知散射角 $\theta = 30°$，计算在铝中的卢瑟福微分散射截面。

(3) 在 $1\,\mathrm{s}$ 时间内有多少粒子进入一个与粒子束方向成 $30°$ 角、位于 $2\,\mathrm{m}$ 远处、半径为 $1\,\mathrm{cm}$ 的圆形计数器中？

(4) 计算散射角 $> 5°$ 的卢瑟福积分散射截面。提示：$\sin\theta\,d\theta = 4\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\,d\theta$。

(5) 每秒有多少粒子被散射到离开原粒子束 $5°$ 以外？

【知识点】微分散射截面 【来源】物理学大题典 *1.4*

题目 1.3. 氢原子和氘原子的巴耳末系的 H_α 和 D_α 线是从 $n = 3$ 到 $n = 2$ 的能级跃迁发出的光谱线，已知 H_α 和 D_α 的波长分别为 $656.280\,\mathrm{nm}$ 和 $656.101\,\mathrm{nm}$，由此确定氢核和氘核的质量比。已知 $m_\mathrm{p} = 1836 m_\mathrm{e}$。

【知识点】玻尔模型 【来源】物理学大题典 *1.47*

题目 1.4. 在原子序数为 Z 的原子中，第一玻尔轨道上电子的平均速度（以光速 c 为单位）为 ()

(A) $Z^{1/2}$ (B) Z (C) αZ (D) $\alpha^2 Z$

【知识点】玻尔模型 【来源】物理学大题典 *1.53*

题目 1.5. 若 a_0 是氢原子的第一玻尔半径，则带两个正电荷的锂离子 $(Z = 3)$ 的第一玻尔半径为 ()

(A) $\frac{a_0}{3}$ (B) $\frac{a_0}{\sqrt{3}}$ (C) $3a_0$ (D) $\sqrt{3}a_0$

【知识点】玻尔模型 【来源】物理学大题典 *1.54*

题目 1.6. μ^- 可看成一个“重电子”，其质量约为电子质量的 200 倍，若氢原子的基态能量为 E_0，则 μ^- 原子形成的奇异原子的基态能量接近于（ ）

(A) E_0 (B) $14E_0$ (C) $200E_0$ (D) $4000E_0$

【知识点】玻尔模型 【来源】物理学大题典 *1.71*

题目 1.7. 已知一团处于基态的氢原子被外来单色光激发后，在其发射的莱曼系谱线中仅观察到四条光谱线。

（1）试求这外来单色光的能量；

（2）与此同时，还可观察到几条光谱线？它们分属于几个谱线系？算出其中波长最长的一条和最短的一条谱线的波长（以上均不考虑精细结构）。

【知识点】玻尔模型；光谱 【来源】物理学大题典 *1.49*

2 量子力学基础

题目 2.1. 在真空室中一个光子打在清洁的铜板表面上，必须加 1 V 的阻止电压才能确保发射的光电子是静止的，如果铜板的功函数为 5.0 eV，那么光子的波长接近于（ ）

(A) 1200 nm (B) 400 nm (C) 300 nm (D) 250 nm

【知识点】光电效应 【来源】物理学大题典 *1.18*

题目 2.2. 电子显微镜中所用加速电压一般都很高，电子被加速后的速度很大，因而必须考虑相对论修正。试证明：电子的德布罗意波长与加速电压的关系应为

$$\lambda = \frac{1.226}{\sqrt{U_r}}\,\mathrm{nm},$$

其中，$U_r = U_a(1 + 0.978 \times 10^{-6} U_a)$ 称为相对论修正电压，而加速电压 U_a 以 V（伏特）为单位。

【知识点】物质波 【来源】物理学大题典 *1.30*

题目 2.3. 在康普顿散射实验中，当入射光的波长分别为 0.050 nm 的 X 射线和 500 nm 的可见光时，反冲电子所获得的最大能量为多少？并分析其结果。

【知识点】康普顿散射 【来源】物理学大题典 *1.16*

题目 2.4. 如果一个电子被限制在核的尺寸范围内，其动量的不确定度为（ ）

(A) 0.2 eV/c (B) 200 eV/c (C) 200 keV/c (D) 200 MeV/c

【知识点】测不准关系 【来源】物理学大题典 *1.20*

3 精细结构

题目 3.1. 以下三个因素对计算氢原子能级都有贡献：I. 电子自旋与质子自旋间的相互作用；II. 电子自旋与其轨道运动间的相互作用；III. 电子质量的相对论变化。下面哪种原因对能级产生了修正？

(A) 由于 I 比 II 和 III 大得多

(B) 由于 II 比 I 和 III 大得多

(C) 由于 III 比 I 和 II 大得多

(D) II 和 III 比 I 大得多

【知识点】精细结构 【来源】物理学大题典 *1.33*

题目 3.2. 在施特恩-格拉赫实验中，原子态的氢从温度为 400 K 的炉中射出，在屏上接收到两条氢束线，其间距为 0.6 cm，若把氢原子换成锰原子（基态为 $^6S_{5/2}$），其他条件不变，那么在屏上可以接收到几条束线？其相邻两束的间距是多少？

【知识点】施特恩-格拉赫实验 【来源】物理学大题典 *2.5*

题目 3.3. 钠原子 ($Z = 11$) 的基态为 $3s$，已知其共振线波数为 $1.6952 \times 10^6\,\mathrm{m}^{-1}$，漫线系第一条线的波数为 $1.2218 \times 10^6\,\mathrm{m}^{-1}$，基线系第一条线的波数为 $5.4158 \times 10^5\,\mathrm{m}^{-1}$，锐线系的系限波数为 $2.4492 \times 10^6\,\mathrm{m}^{-1}$。

1. 试画出与上述谱线有关的能级跃迁图，在图中标出各能级的相应量子数及各谱线的波数；
2. 计算各有关能级的谱项值 T_n（用 m^{-1} 表示）；
3. 计算对 $3s, 3p, 3d$ 电子，原子实的有效核电荷数（只需两位有效数字），并简要阐述这一结果的物理意义。

【知识点】光谱 【来源】物理学大题典 *2.10*

题目 3.4. 氢原子 2p 态的自旋-轨道分裂约为（ ）

【知识点】自旋轨道耦合 【来源】物理学大题典 *2.15*

题目 3.5. 由于自旋-轨道耦合效应，氢原子的 $2p_{3/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 的能级差为 4.5×10^{-5} eV。

(1) 求莱曼系的最小频率的两条精细结构谱线的频率差和波长差；

(2) 氢原子处于 $n = 2, l = 1$ 的状态时，电子感受到的磁场多大？

【知识点】自旋轨道耦合 【来源】物理学大题典 *2.18*

题目 3.6. 已知铯原子主线系的第二条谱线的双重结构成分的波长分别为 459.3 nm 和 455.5 nm，试求其有效核电荷数 Z^*（铯 $Z = 55$）。

【知识点】自旋轨道耦合；有效核电荷数；光谱 【来源】物理学大题典 *2.20*

题目 3.7. 某类氢离子其莱曼系第一条谱线是由波数差为 $228.40\,\mathrm{cm}^{-1}$ 的两条谱线构成的，请问其为何种类氢离子？

【知识点】精细结构；光谱 【来源】物理学大题典 *2.25*

题目 3.8. 考虑精细结构，试画出锂原子从 $3d$ 态返回到 $2s$ 态时，所有可能的能级跃迁，有几种跃迁？标明各能级的原子态符号。

【知识点】精细结构；选择跃迁定则 【来源】物理学大题典 *2.21*

题目 3.9. 计算：

(1) 在地磁场 ($B = 5 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$) 中；

(2) 在 $B = 5\,\mathrm{T}$ 的外磁场中，

总自旋为零的原子 ($^1s_0$ 除外) 的拉莫尔频率，并将所得结果与氢原子中的电子在第一玻尔轨道上的转动频率作比较。

【知识点】拉莫进动 【来源】物理学大题典 *2.45*

题目 3.10. 原子处在状态 ^3F 的角动量以角速度 $\omega = 5.5 \times 10^9\,\mathrm{rad \cdot s^{-1}}$ 在 $B = 0.05\,\mathrm{T}$ 的磁场中旋进，试确定原子的角动量和磁矩。

【知识点】拉莫进动；角动量；g 因子计算 【来源】物理学大题典 *2.47*

题目 3.11. 当电子处在 0.5 T 的磁场中时，两种自旋取向的电子间的能量差是多少？当自旋取向改变时辐射的光子波长是多少？

【知识点】自旋磁矩 【来源】物理学大题典 *2.46*

题目 3.12. 试画出 $^2D_{5/2} \to ^2P_{3/2}$ 谱线在弱磁场中的能级跃迁图，并计算其塞曼成分与原谱线的波数差。

【知识点】塞曼效应；选择跃迁定则 【来源】物理学大题典 *2.53*

题目 3.13. 就磁场对受激钠蒸气所产生的黄光（600.0 nm 左右）光谱结构的影响进行试验（塞曼效应），观测从平行于或垂直于磁场方向发出的光谱。

(1) 描述：(i) 磁场引入前的光谱；(ii) 磁场引入后，上述两个方向上光谱改变的情况；(iii) 上两种情况下光谱成分的偏振态。

(2) 如果有一个分辨率（$\lambda/\delta\lambda$）为 100000 的显微镜，需要多大磁场才能清晰地分辨由此引起的分裂。

【知识点】塞曼效应；选择跃迁定则；辐射光子的偏振态 【来源】物理学大题典 *2.55*

题目 3.14. 相应于 $J = 1 \to J = 0$ 跃迁的一条特定光谱线，在 0.1 T 的磁场中分裂成三条，裂距为 0.00016 nm，无磁场时该谱线的波长为 184.9 nm。

(1) 确定这种塞曼效应是正常的还是反常的；

(2) 激发态的磁矩是多少？

【知识点】塞曼效应 【来源】物理学大题典 *2.51*

题目 3.15. （1）计算氢原子 2p 态由于自旋-轨道耦合引起的能量差。

（2）若在外磁场中引起谱线分裂，相邻线的能量差为 $\Delta E_z = 4.50 \times 10^{-4}\,\mathrm{eV}$，请问在此磁场下发生的是正常塞曼效应、反常塞曼效应还是帕邢-巴克效应？求外磁场的磁感应强度。

【知识点】塞曼效应；帕邢-巴克效应 【来源】物理学大题典 *2.54*

4 多电子原子

题目 4.1. 示意画出 He 原子 $n = 1, 2, 3$ 的能级图，指出电子组态并给出这些能级的光谱符号。画出允许的发射跃迁。

【知识点】双电子 L-S 耦合；选择跃迁定则 【来源】物理学大题典 *3.3*

题目 4.2. 对于处在 1s3d 电子组态的氦原子，试画出考虑下列作用时的能级系列图：

(1) 只考虑各电子与核的库仑引力；

(2) 考虑各电子间的静电排斥；

(3) 计入自旋-轨道耦合；

(4) 外加弱磁场的影响。

【知识点】*L-S* 耦合；塞曼效应 【来源】物理学大题典 *3.5*

题目 4.3. 考虑一个假设的宇宙，其中的电子自旋是 3/2 而不是 1/2。

(1) 在无外场时，画出氢原子 $n = 3$ 的能级图。以光谱符号标记每一个态（忽略超精细结构）。

(2) 定性讨论双电子 He 的能级，尤其指出与自旋 $\frac{1}{2}$ 的电子的 He 之差别。

(3) 此时周期表中头两个惰性气体元素的原子序数是多少？

【知识点】双电子 *L-S* 耦合；泡利不相容原理原理 【来源】物理学大题典 *3.11*

题目 4.4. 设某原子具有两个价电子 (pd)，分别用 $L-S$ 和 $j-j$ 耦合模型求可能的原子态。

【知识点】*L-S* 耦合；*j-j* 耦合 【来源】物理学大题典 *3.18*

题目 4.5. 求 np^2 和 np^4 电子组态所形成的原子态。

【知识点】双电子 *L-S* 耦合；多电子 *L-S* 耦合 【来源】物理学大题典 *3.20*

题目 4.6. 满壳层外面加一个 d 电子的原子的可能状态是（ ）

【知识点】多电子 *L-S* 耦合；光谱项符号 【来源】物理学大题典 *3.13*

题目 4.7. 试用 L-S 耦合法给出电子组态 $1s^2 2s^2 2p^5 3p^1$ 所有的原子态，并用相应的光谱符号表示之。

【知识点】多原子激发态的 *L-S* 耦合 【来源】物理学大题典 *3.29*

题目 4.8. 已知原子的电子组态为 p^3，用 $L-S$ 耦合，求所有可能的原子态。

【知识点】多电子 *L-S* 耦合 【来源】物理学大题典 *3.19*

题目 4.9. 列出下列原子的基态组态和最低能量光谱项：He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne。

【知识点】多原子基态组态 【来源】物理学大题典 *3.7*

题目 4.10. 写出钠原子的基态电子组态和原子态，如果价电子被激发到 3d 态，问向基态跃迁时可能发射出几条光谱线？试画出能级跃迁图（考虑精细结构），并说明之。

【知识点】多电子 *L-S* 耦合；选择跃迁定则 【来源】物理学大题典 *3.17*

题目 4.11. 铍 (Be) 的基态有两个 1s 电子和两个 2s 电子, 最低的激发态是其中一个 2s 电子被激发到 2p 态而形成的。

(1) 列出这些态, 并给出每个态的角动量量子数;

(2) 按能量增大的次序排列这些态。

【知识点】多电子 L-S 耦合；洪特规则 【来源】物理学大题典 *3.24*

题目 4.12. 写出碳原子基态的电子组态，用光谱学符号表示基态并说明原因。根据洪德定则决定能级次序。

【知识点】多电子 L-S 耦合；洪特规则 【来源】物理学大题典 *3.28*

题目 4.13. 钪原子基态的电子组态为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d 4s^2$。

(1) 该电子组态可形成哪些原子态？

(2) 该电子态包含哪些多重态？试用光谱学符号表示之。这些态能量大小的顺序如何？

(3) 该基态多重态中的两个最低能级间的分裂间距为 $168\,\mathrm{cm}^{-1}$，求温度为 2000 K 时这两个能级上粒子的相对分布。

【知识点】多电子 L-S 耦合；洪特规则；粒子数分布 【来源】物理学大题典 *3.30*

5 X 射线

题目 5.1. 以钼 (Z=42) 为靶子的 X 射线管产生的连续 X 光谱的短波限为 0.040 nm，试问能否观察到其 K 系特征 X 射线？

【知识点】特征辐射；韧致辐射 【来源】物理学大题典 *3.64*

题目 5.2. 已知铅的 K 吸收限为 0.0141 nm，K 线系各谱线的波长分别为 0.0167 nm (K_α); 0.0146 nm (K_β); 0.0142 nm (K_γ)。

(1) 根据这些数据绘出有关铅的 X 射线能级简图；

(2) 计算激发 L 线系所需的最小能量及 L_α 线的波长。

【知识点】特征辐射；能级结构 【来源】物理学大题典 *3.61*

题目 5.3. 在锌（$Z = 30$）中，K 和 L 壳层的电离能分别为 9.659 keV 和 1.021 keV，试求出 $K_\alpha X$ 射线引起的从 L 壳层发射出来的俄歇电子的动能。

【知识点】俄歇电子 【来源】物理学大题典 *3.62*

题目 5.4. 物质对 X 射线区域的吸收截面除了在某些光子能量有尖锐的下降外，基本上是随光子能量下降单调增加的，对锌（$Z = 30$）来说，尖锐下降的光子能量为 9.678 keV，1.236 keV，1.047 keV 和 1.024 keV。

(1) 指出 X 射线吸收截面尖锐下降处所对应的跃迁；

(2) 求锌的能量高于 5 keV 的 X 射线能量，并指出相应的跃迁；

(3) 计算 Zn^{29+} 的电离能（Zn^{29+} 表示锌原子被移去 29 个电子）；

(4) 为什么 (3) 中的结果与 9.678 keV 相差甚大？

(5) 连续辐射通过某气体后，其出射谱通常称为吸收谱。在可见光及紫外区出现吸收线，而在 X 射线区域出现吸收边。为什么会出现这种差别，这两种差别的物理根源是什么？

【知识点】特征辐射；选择跃迁定则；玻尔模型 【来源】物理学大题典 *3.66, 3.77*

题目 5.5. 思考题：

(1) 详细描述在 X 射线发射中确定特征谱线波长的实验安排；

(2) 通过测量一系列元素的 X 射线谱，莫塞莱能确定每一个元素的原子序数，试解释之；

(3) 从某一固定靶中发出的特征谱线一般不能为相同材料的物质所吸收，例如，重元素吸收谱中 K_α 线是观测不到的，为什么？

(4) 当一靶受到某种能量的电子轰击时，解释发出连续 X 射线谱的原因，这个谱的哪些方面与经典电磁理论不一致？

【来源】物理学大题典 *3.70*

题目 5.6. 把热中子束射到晶体上，由布拉格衍射图样可以求得热中子的能量。若晶体的原子间距为 0.18 nm，一级布拉格掠射角为 30°，试求这些中子的能量。

【知识点】布拉格衍射 【来源】物理学大题典 *3.72*

题目 5.7. 氯化钠是立方晶体结构，每个晶胞包含 4 个 Na 原子和 4 个 Cl 原子。Na 和 Cl 的原子量分别是 23.0 和 35.5，NaCl 的密度 ρ 为 2.16 g/cm^3。

(1) 计算能够产生布拉格衍射的 X 射线最大波长；

(2) 对于波长为 0.4 nm 的 X 射线，试给出各级布拉格衍射的级次和角度。

【知识点】布拉格衍射；原子实心球模型 【来源】物理学大题典 *3.75*